УДК 691.421.001.4

© В. В. Инчик, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: lira45@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-86-92

© V. V. Inchik, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
Email: lira45@list.ru

МИКРОБНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ И СОЛЕВАЯ КОРРОЗИЯ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ

MICROBIAL DETERIORATION AND SALT CORROSION OF MASONRY

Дана характеристика тионовых и нитрифицирующих бактерий, приводящих к развитию биодеструкционных процессов кирпичной кладки; проведен микробиологический анализ образцов разрушенных строительных материалов — кирпича и кладочного раствора; определен объем открытых пор материалов, подвергшихся разрушению деструкцией; описаны химические процессы, происходящие в результате воздействия продуктов метаболизма микробов на строительные материалы, приводящие к их разрушению.

Ключевые слова: кирпичная кладка, солевая коррозия, деструкция, метаболизм, литотропные бактерии, тионовые бактерии, нитрифицирующие бактерии, ртутная порометрия, биохимический анализ, поровая структура, эрозионная коррозия, высолы, кристаллогидраты, мирабилит, алуноген, алуминит, таумасит, натровые квасцы, белит.

The article presents the characteristics of thionic and nitrifying bacteria microorganisms which induce the development of biological destruction processes of brickwork. There has been carried out a microbiological analysis of samples of damaged building materials (brick and masonry mortar); the volume of open pores of materials subjected to biological destruction has been determined. The author describes chemical processes taking place as a result of the impact of microbial metabolism products negatively affecting building materials, which leads to the materials' damage.

Keywords: masonry, salt corrosion, deterioration, metabolism, lithothropic bacteria, thionic bacteria, nitrifying bacteria, mercury injection, biochemical analysis, pore structure, erosion corrosion, efflorescence, crystalline hydrates, mirabilite, keramohalite, aluminite, thaumasite, sodium alum, belit.

Участие микроорганизмов в разрушении кирпичных конструкций было обнаружено еще в конце XIX века, но их деятельность стала предметом изучения только в 50-х годах XX века [12]. В дальнейшем результаты разрушения были обнаружены не только в гражданских и промышленных сооружениях [3–5], но и в сооружениях подземных [1, 3–5].

С целью проведения микробиологического анализа разрушенных стеновых керамических материалов для испытаний отбирались кирпичи, имеющие шелушение поверхностного слоя, трещины, выкрошенные ребра и углы.

Для определения причин разрушения у материалов определялся объем открытых пор методом ртутной порометрии. Кроме этого, кирпичные конструкции, работавшие в условиях насыщения влагой и перепадов температур, подвер-

гались биохимическому анализу. Материалы для таких исследований были отобраны при обследовании кирпичных стен чердака Исаакиевского собора (рис. 1), гостиницы «Англетер» (кирпичные стены подвала), кирпичной ограды кладбища Александро-Невской лавры, балюстрады Дворца А. Д. Меншикова в Ораниенбауме (рис. 2) и кирпичных сводов Казанского моста на канале Грибоедова (рис. 3) и др.

Во второй половине XX в. российскими учеными было установлено, что достаточно часто причинами разрушения кирпичной кладки являются микробы, воздействие которых по своему механизму различно и зависит от их природы, характера среды в поровой структуре кирпича и свойств строительных материалов [9, 10, 13].

Возбудителями микробной коррозии является группа так называемых литотропных бак-

Рис. 1. Высолы, шелушение и выкрошивание отдельных кирпичей на кирпичной кладке чердака Исаакиевского собора

Рис. 2. Разрушение кирпичной кладки балюстрады Дворца А. Д. Меншикова в Ораниенбауме

терий, получающих энергию от окисления неорганических соединений. Среди них наиболее опасны для строительных материалов тионовые и нитрифицирующие бактерии.

Рис. 3. Снятие солевых налетов с кирпичного свода Казанского моста

Тионовые бактерии (род *T. thiooxidans*) способны развиваться в очень кислой среде при pH 0,6. Они окисляют серу до серной кислоты, используя выделяющуюся энергию для синтетических процессов и роста организма:

Нитрифицирующие бактерии получают энергию за счет окисления аммиака до нитритов и нитратов. Образование азотистой кислоты ведут бактерии рода *Nitrosomonas*:

Образование азотной кислоты идет при участии бактерий рода *Nitrobacter*:

Азотная кислота при взаимодействии со щелочами, содержащимися в стеновой керамике, образует солевые налеты (высолы), называемые стеной селитрой ($NaNO_3$). Такие солевые образования на кирпичной кладке являются индикатором, свидетельствующим о поражении материалов нитрифицирующими бактериями [2, 6, 12].

При обследовании состояния 11 кирпичных конструкций зданий, сооружений и памятников архитектуры Санкт-Петербурга и его пригородов отмечалось насыщение их фрагментов влагой атмосферной, грунтовой, конденсационной, речной, а также загрязнение городской пылью. Подобное состояние кирпичной кладки создавало благоприятную среду для развития вышеперечисленных микроорганизмов, опасных для строительных материалов. А многочисленные дефекты кирпичных стен, такие как отвал штукатурки, шелушение и выкрошивание кирпича, выпадение отдельных кирпичей из кладки и образование высолов (рис. 4), свидетельствовали, что причинами разрушения могла быть не только эрозионная коррозия (разрушение материала кристаллами льда), но и коррозия солевая и микробная.

При изучении причин возникновения дефектов кирпичной кладки отбирались образцы кирпича или куски стенового материала и кладочного раствора. Отобранные материалы подвергались анализу на кафедре микробиологии Санкт-Петербургского государственного университета при участии профессора Б. В. Громова, также изучался методом ртутной порометрии объем открытых пор разрушенных материалов.

Результаты проведенного микробиологического анализа и порометрии (табл. 1) показывают, что кирпичные стены обследованных зданий в различной степени были поражены тионовыми и нитрифицирующими бактериями.

Рис. 4. Отслоение штукатурки и деструкция кирпичной кладки фасада бани Фрунзенского района

Степень поражения материалов определялась характером метаболизма и pH среды, температурой, видами влаги, глубиной проникновения органической и минеральной пыли в поры строительных материалов. Диаметр и объем открытых пор кирпича и кладочного раствора также обуславливали развитие разрушительных процессов и определяли возможность образования в поровом пространстве опасных многоводных кристаллогидратов.

Рентгенофазовый анализ позволил обнаружить в образцах разрушенной стеновой керамики и кладочного раствора следующие кристаллогидраты: мирабилит, алуноген, алуминит, таумасит, натровые квасцы [8] (табл. 2).

Формулы кристаллогидратов даны на основании литературных данных, а величины кристаллизационного давления для соответствующих минералов представлены на основании собственных исследований по методике А. И. Минаса [11].

Разрушение структурообразующих компонентов цементного камня — матрицы цементно-песчаного раствора, проходило под воздействием серной и азотной кислот — продуктов метаболизма тионовых и нитрифицирующих бактерий.

Серная и азотная кислоты разрушали структурообразующие минералы цементного камня кладочного раствора в результате реакций:

(Продукты вышепредставленных реакций — сульфаты алюминия и железа, а также гель кремниевой кислоты ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$) — вымывались из поровой структуры кладочного раствора и кирпича, значительно уменьшая прочность шва кирпичной кладки и кладки в целом.)

Таблица 1
Микробиологическая характеристика и объем открытых пор образцов разрушенной строительной керамики

№ п/п	Название объекта и конструкций зданий	Образцы разрушенного материала	Среда обитания микроорганизмов	Количество бактерий в граммах образца ×10 ³		Общее количество микроорганизмов в граммах образца ×10 ³	Объем открытых пор, см ³ /г
				тионовых	нитрифицирующих		
1	Исаакиевский собор, внутренние стены чердака	Кирпич и куски кирпича	Влага атмосферная и конденсационная, пыль атмосферная и органическая	112	210	870	0,221
2	Кладбище Александровской лавры, кирпичная ограда	То же	Останки захоронений, влага атмосферная и грунтовая	650	530	2020	0,236
3	Казанский мост, своды моста	—	Речная вода с примесью стоков органического происхождения	475	310	1208	0,212
4	Дворец А. Д. Меншикова, Ораниенбаум, конструкция балюстрады	—	Атмосферные осадки, растительная пыль	110	125	1980	0,260
5	Гостиница «Англетер», стены подвала	—	Грунтовые и сточные воды	85	118	580	0,268
6	Дом И. Ф. Лопатина, Невский пр., 68/40, стены подвала	Куски кирпича	Грунтовые и сточные воды	89	98	460	0,183
7	Дом М. Г. Разумовской, Большая Морская ул., 29, развал снесенного здания	Куски кирпича	Конденсационная влага	99	113	568	0,198
8	Доходный дом, Кирпичный пер., 1/4, развал снесенного здания	Кирпич и куски кирпича	Конденсационная влага	78	128	394	0,111
9	Доходный дом «Саламандра», Гороховая ул., 4, стены подвалов	То же	Грунтовые воды	415	360	775	0,162
10	Главное Адмиралтейство, стены подвала	—	Грунтовые воды	143	244	880	0,175
11	Баня Фрунзенского района, стена фасада	Куски кирпича и штукатурки	Технологическая и атмосферная влага	130	118	660	0,190

Таблица 2

**Названия обнаруженных минералов, их формулы, рефлексy рентгенограмм
и кристаллизационное давление, возникающее в порах кирпича**

Название минерала	Формула кристаллогидрата	Характерные рефлексy рентгенограммы	Кристаллизационное давление, МПа
Мирабилит	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$	4,62	0,44
Алуноген	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$	2,46; 3,04; 3,95; 4,43; 4,70	0,42
Алуминит	$\text{Al}_2(\text{OH})_2 \times \text{SO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	2,88; 3,75; 6,13; 7,60	0,32
Таумасит	$\text{CaSO}_4 \times \text{CaSiO}_3 \times \text{CaCO}_3 \times 15\text{H}_2\text{O}$	2,46; 2,66; 3,66; 9,70	0,30
Натровые квасцы	$\text{Na} \times \text{Al}(\text{SO}_4)_2 \times 12\text{H}_2\text{O}$	2,77; 3,05; 3,50; 4,22	0,28

(В результате указанных реакций происходило образование легкорастворимых нитратов алюминия и кальция, а также геля кремниевой кислоты, что также приводило к деструкции кирпичной кладки.)

Было сделано предположение, что азотная кислота, которая вырабатывается нитрифицирующими бактериями, может также разрушать керамический кирпич в результате образования в его порах тетрагидрата нитрата кальция — $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$, кристаллизационное давление которого в порах материала пока не удалось определить.

Образование многоводных кристаллогидратов представлено следующими реакциями.

Кристаллизация **алуинита** в порах кладочного раствора лицевой части кирпичной кладки чердака Исаакиевского собора происходила с участием серной кислоты и воды:

Образование **натровых квасцов** в порах стеновой керамики кирпичной конструкции балюстрады Большого Меншиковского дворца в Ораниенбауме происходило по реакции

Таумасит в кирпичной кладке чердака Исаакиевского собора мог образовываться в результате участия гидратированного белита, гипса и углекислого газа, постоянно выделявшегося при горении свечей:

Образование **алуногена** в кирпичной кладке гостиницы «Англетер» происходило в результате реакции между гидратированным алитом за-

твердевшего кладочного раствора и серной кислотой:

Результат изучения характера микроорганизмов и продуктов их метаболизма позволил сделать важный вывод: кирпичная кладка разрушается не собственно микроорганизмами, а продуктами их жизнедеятельности — кислотами.

Серная кислота, выделяемая тионовыми бактериями, разрушает структурообразующие минералы цементно-песчаного кладочного раствора с образованием многоводных кристаллогидратов, являющихся агентами солевой коррозии [8].

Данные исследований, приведенные в табл. 1, позволили сформулировать следующие выводы:

1. Разрушение кирпича, кладочного раствора и фрагментов кирпичной кладки происходило, прежде всего, в результате насыщения кирпичных конструкций влагой различных видов. В большей мере разрушались кирпичные стены, имеющие кирпич с высоким объемом открытых пор, что определялось проникновением в них влаги, пыли различных видов и жидкости с содержанием компонентов органического происхождения.

2. Влага, пыль, жидкости различного состава создавали благоприятные условия для метаболизма микроорганизмов — тионовых и нитрифицирующих, которые в результате своей деятельности выделяли соответственно серную и азотную кислоты, разрушающие затвердевший кладочный раствор и стеновую керамику, особенно в том случае, когда воздействие кислот приводило к образованию многоводных кристаллов.

3. Многоводные кристаллогидраты, которые были обнаружены путем рентгенофазового анализа, такие как $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na} \cdot \text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \times 15\text{H}_2\text{O}$, создавали в порах кирпича и кладочного раствора кристаллизационное давление в пределах от 0,21 до 0,44 МПа, которое способно разрушать любой пористый строительный материал [11].

4. Защиту кирпичных конструкций от микроорганизмов следует вести методами гидрофобизации строительных материалов, созданием оптимального влажностно-температурного режима в помещениях, совершенствованием сточных и водосбрасывающих систем зданий и сооружений¹ [7–8, 14].

Библиографический список

1. Андреев Е. И., Козлова И. А., Коптева Ж. П. Микробная коррозия подземных сооружений // Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф. Саранск, 2006. С. 79–99.
2. Андреев Е. И., Билай В. И., Коваль Э. З., Козлова И. А. Микробная коррозия и ее возбудители. Киев: Наукова думка, 1980. 287 с.
3. Анисимов А. А., Александрова И. Ф. О биохимических механизмах действия фунгицидов // Биоповреждения в промышленности. Горький, 1983. С. 7–17.
4. Биоповреждения в строительстве / под ред. Ф. М. Иванова, С. Н. Горшина. М.: Стройиздат, 1984. 320 с.
5. Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: Н. И. Карпенко, В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов и др. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004. 255 с.
6. Громов Б. В. Строение бактерий. Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. 190 с.
7. Защита от коррозии старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справочник. В 2 т. / под ред. А. А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. Т. I. 688 с. Т. II. 784 с.
8. Инчик В. В. Высолы и солевая коррозия кирпичных стен. СПб.: СПбГАСУ, 1998. 324 с.
9. Исаченко Б. Л. Избранные труды: В 2 т. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1951. Т. I. 410 с.

¹ ВСН 20-01–2006. Защита строительных конструкций, зданий и сооружений от агрессивных химических и биологических воздействий окружающей среды. Письмо Минрегиона России от 14.04.2006 № 2724-РМ/07.

10. Лугаускас А. Ю., Микуйскене А. И., Шляужене Д. Ю. Каталог микромицетов-биодеструкторов полимерных материалов. Биологические повреждения. М.: Наука, 1987. 344 с.

11. Минас А. И. Результаты изучения солевой формы физической коррозии строительных материалов // Сб. тр. Казахского филиала Академии строительства и архитектуры СССР. 1960. № 2 (4). С. 14–19.

12. Рубан Е. Л., Коваль Э. З. и др. Физиология и биохимия нитрифицирующих микроорганизмов. Киев: Наукова думка, 1980. 274 с.

13. Чуйко А. В. Органогенная коррозия строительных материалов и конструкций. 2-е изд. Саратов: СПИ, 1976. 79 с.

14. Бочаров Б. В. Химическая защита строительных материалов от биологических повреждений // Биоповреждения в строительстве. М.: Стройиздат, 1984. С. 35–47.

References

1. Andreyuk, E. I., Kozlova I. A., Zh. P. Kopteva. *Mikrobnaya korroziya podzemnykh sooruzheniy* [Microbial corrosion of underground structures]. *Trudy Vtoroy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve»* [Proc. of the 2-nd Int. sci.-tech. conf. "Biological deterioration and corrosion in construction"]. Saransk, 2006, pp. 79–99.
2. Andreyuk E. I., Bilay V. I., Koval' Eh. Z., Kozlova I. A. *Mikrobnaya korroziya i ee vzbuditeli* [Microbial corrosion and its pathogens]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980, 287 p.
3. Anisimov A. A., Aleksandrova I. F. *Biopovrezhdeniya v promyshlennosti* [Biologically induced deterioration in construction]. Gorkiy, 1983, pp. 7–17.
4. *Biopovrezhdeniya v stroitel'stve* [Biological damage in construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 320 p.
5. *Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve»* [Proc. of Int. sci.-tech. conf. "Biological deterioration and corrosion in construction"]. Ed. by Karpenko N. I., et al. Saransk, Mordovia State University Publ., 2004, 255 p.
6. Gromov B. V. *Stroenie bakteriy* [Bacteria structure]. Leningrad, LSU Publ., 1985, 190 p.
7. *Zashchita ot korrozii stareniya i biopovrezhdeniy mashin, oborudovaniya i sooruzheniy* [Protection from corrosion, ageing and biological deterioration of machines, equipment and structures]. Reference book in 2 vols. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, vol. I, 688 p. vol. II, 784 p.
8. Inchik, V. V. *Vysoly i solevaya korroziya kirpichnykh sten* [Efflorescence and salt corrosion of brick walls]. St. Petersburg, 1998, 324 p.

9. Isachenko B. L. *Izbrannye trudy* [Selected works]. In 2 vols. Moscow–Leningrad, SSSR Publ., 1951, vol. 1, 410 p.
10. Lugauskas A. Yu., Mikul'skine A. I., Shlyauzhene D. Yu. *Katalog mikromitsetov – biodistruktorov polimernykh materialov* [Catalogue of micromycetes – biodestructors of polymeric materials]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 344 p.
11. Minas, A. I. *Rezultaty izucheniya solevoy formy fizicheskoy korrozii stroitel'nykh materialov* [Results of the study of salt form of building material physical corrosion]. *Trudy kazakhskogo filiala Akademii stroitel'stva i arkhitektury SSSR – Proc. of the Kazakh branch of the Academy of construction and architecture of the USSR*, 1960, no. 2(4), pp. 14–19.
12. Ruban, E. L., et al. *Fiziologiya i biokhimiya nitrifitsiruyushchikh mikroorganizmov* [Physiology and biochemistry of nitrifying microorganisms]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980, 274 p.
13. Chuyko, A. V. *Organogennaya korroziya stroitel'nykh materialov i konstruktiv* [Organogenic corrosion of building materials and structures]. Saratov, 1976, 79 p.
14. Bocharov, B. V. *Khimicheskaya zashchita stroitel'nykh materialov ot biologicheskikh povrezhdeniy* [Chemical protection of building materials from biological deterioration]. *Biopovrezhdeniya v stroitel'stve* [Biological deterioration in construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, pp. 35–47.